
PERFORMANCES DU HIGH GRANULARITY CALORIMETER DE CMS

Axel BUCHOT PERRAGUIN

Sous la direction de **Christophe OCHANDO**

Au Laboratoire Leprince-Ringuet

Sommaire

1. Contexte du stage
2. Le projet HGCAL
3. Etude des performances du calorimètre
 - Les électrons
 - Les pions
4. Etude des performances de mesures temporelles
5. Conclusion
6. Références

Contexte du stage

Contexte du stage

L'École Polytechnique

- Ecole d'ingénieur fondée en 1794
- Située à Palaiseau en région parisienne
- A accueilli et formé de nombreuses personnalités reconnues

Le laboratoire Leprince-Ringuet

- Laboratoire de physique des particules
- UMR sous tutelle du CNRS/IN2P3 et de l'X

La collaboration CMS

- Collaboration scientifique internationale
- Travaille sur l'expérience CMS du LHC au CERN
- A l'origine de la découverte du boson de Higgs



Contexte du stage

Le contexte physique

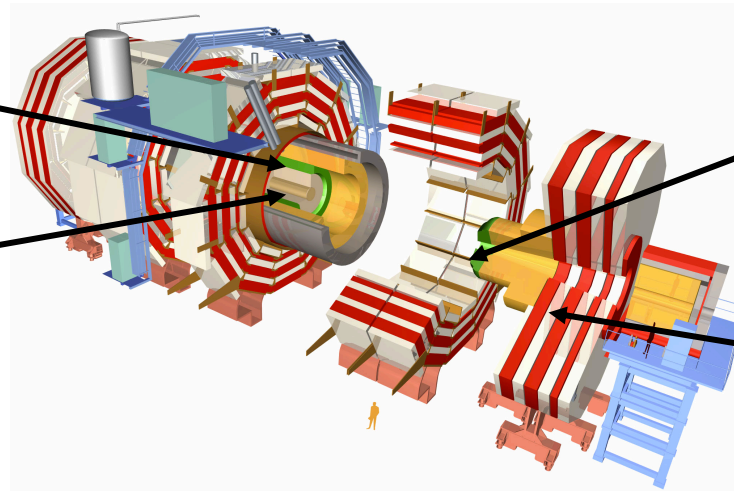
- Découverte du boson de Higgs en 2012
- Depuis découverte des couplages du bosons Higgs avec d'autres bosons et des particules de 3^{ème} génération
- Maintenant, recherche de processus rares : $H \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $H \rightarrow c \bar{c}$, di-H... mais pour cela il faut plus de stats

Le HL-LHC

- Future phase du LHC, débutant en 2026
- Passer de 300 fb^{-1} à 3000 fb^{-1} → Statistique ↑
→ Pill-up ↑ & Taux de radiation ↑ (5 fois plus important)
- Changement et amélioration des détecteurs qui ne sont plus prévus pour ça

Calorimètre
central

Tracker



Calorimètres
bouchons

Systèmes à
muons

Contexte du stage

Objectifs du stage

- Mesurer les performances de prototypes du calorimètre
 - Calculer la linéarité, la résolution, les profils des gerbes...*
 - Comparer les résultats de l'expérience avec ceux de la simulation et du TDR*
- Mesurer les performances de mesures temporelles

Le projet HGCAL

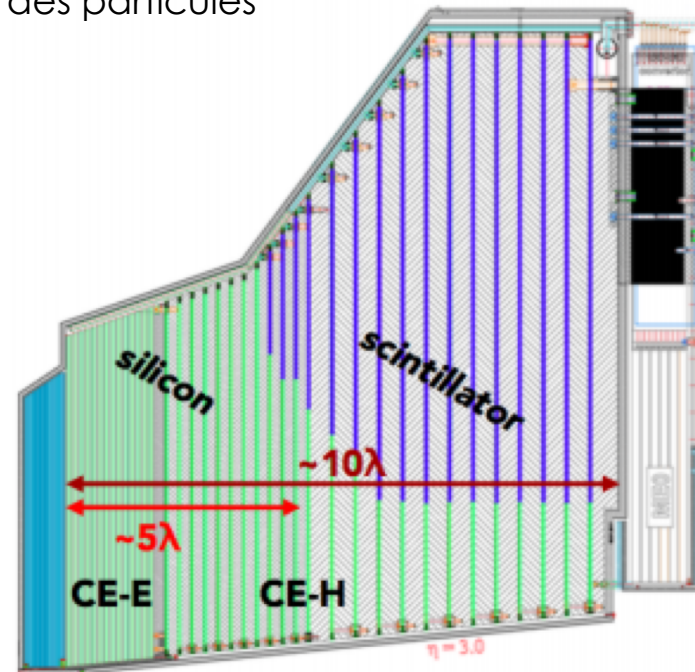
Le projet HGCAL

Le projet HGCAL

- Futur calorimètre à échantillonnage pour les endcaps de CMS
- Couverture angulaire de $1,5 < \eta < 3$
- Résiste à des taux de radiation 5 fois plus élevés que les calorimètres actuels
- Très haute résolution
- Détecteur 5D \rightarrow Position (x,y,z), énergie et temps des particules
- Fast timing \rightarrow 50 ps pour la résolution temporelle

Le détecteur

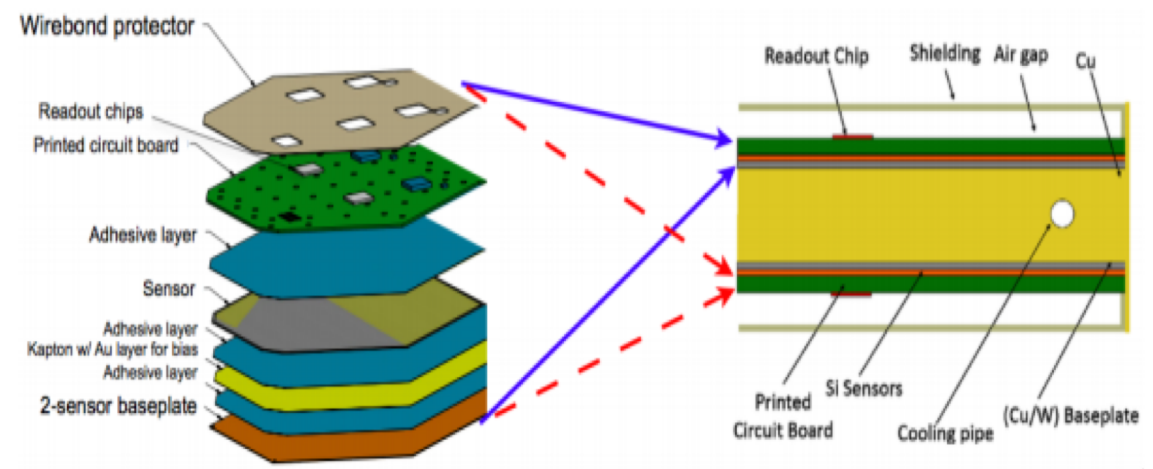
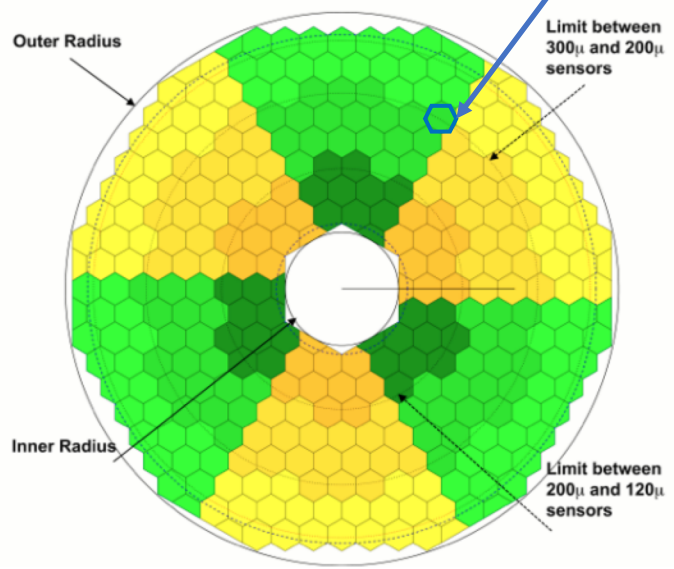
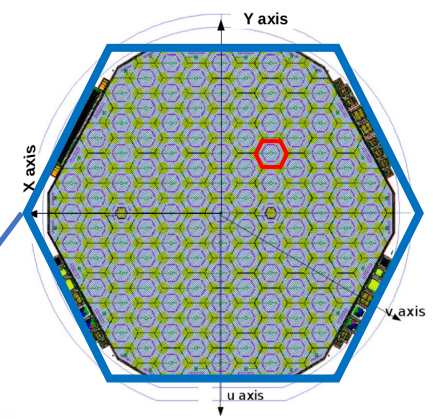
28 couches CE-E + 24 couches CE-H
(scintillateurs pour les faibles taux de radiation)



Le projet HGCAL

Le détecteur

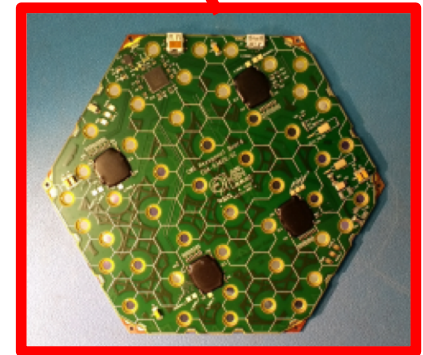
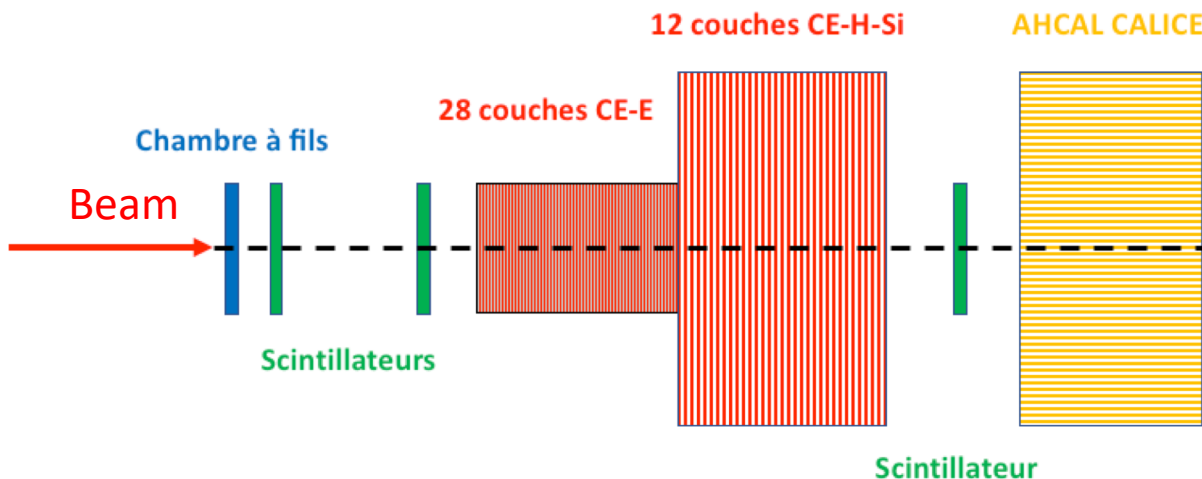
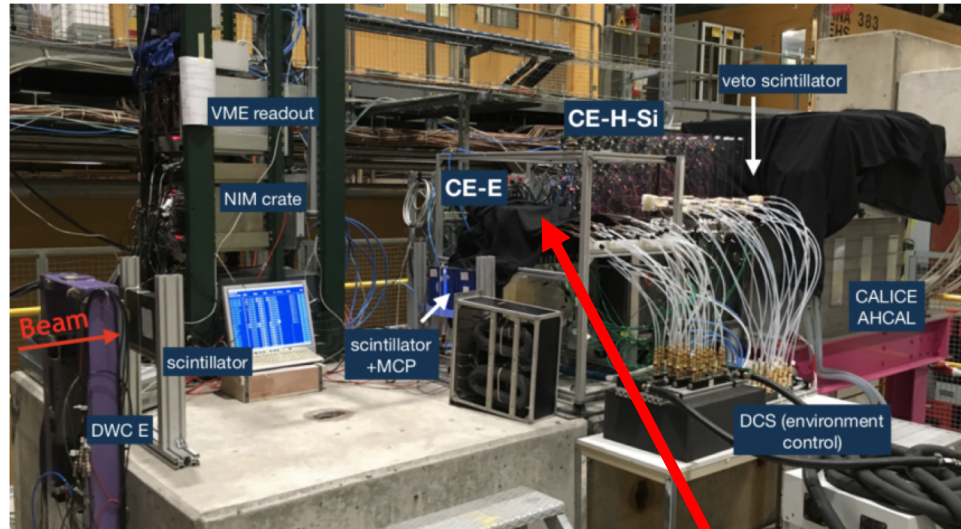
- 27 000 modules
- 6 000 000 de cellules



Le projet HGCAL

L'expérience réalisée

- 28 modules CE-E
(calorimètre électromagnétique)
+ 12 couches de 7 modules CE-H-Si
(calorimètre hadronique)
- Chambre à fils → Temps de référence
- 3 scintillateurs → Trigger
- Tuiles scintillantes AHCAL de CALICE

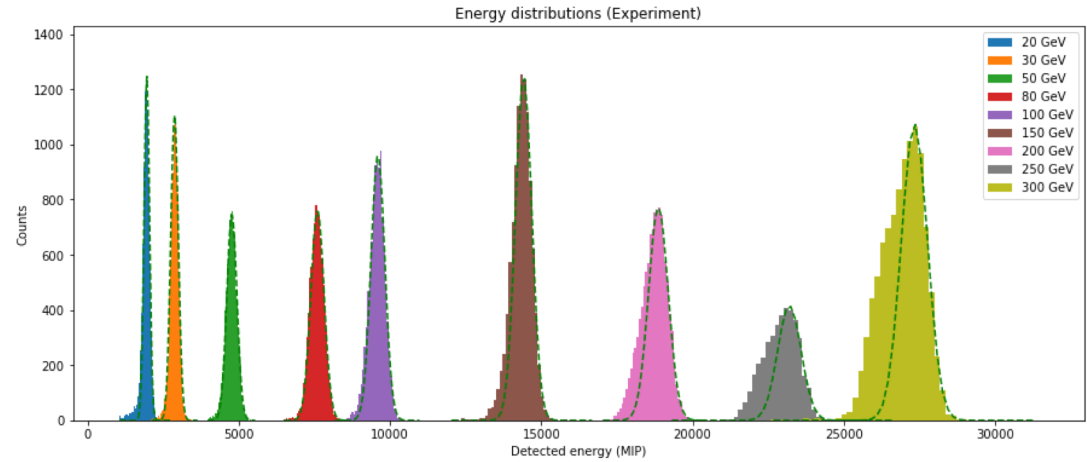


Etude des performances du calorimètre - Les électrons

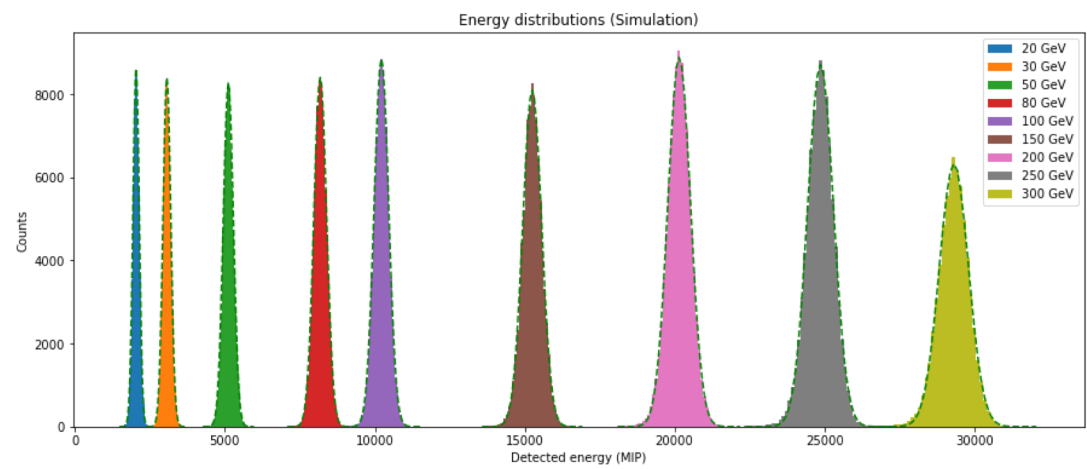
Distribution en énergie

Distribution de l'énergie détectée :

- Expérience : Queue de distribution à gauche due à une cellule défailante dans la couche 9
- On ne prend en compte que la partie gaussienne



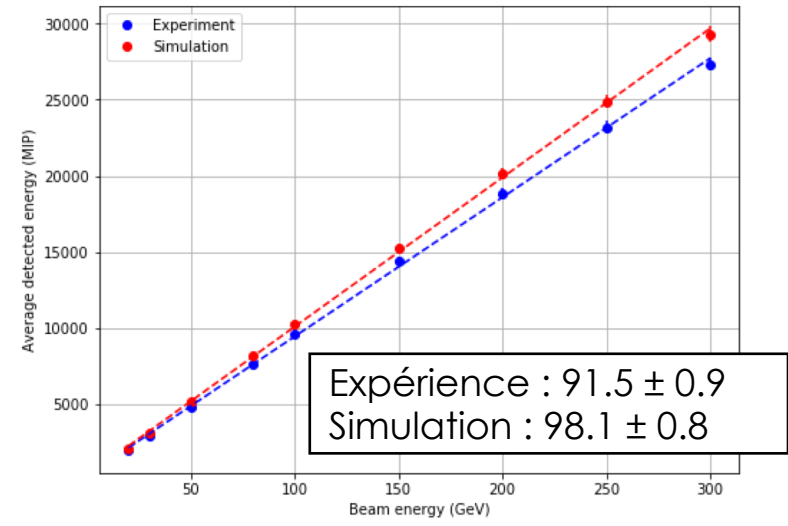
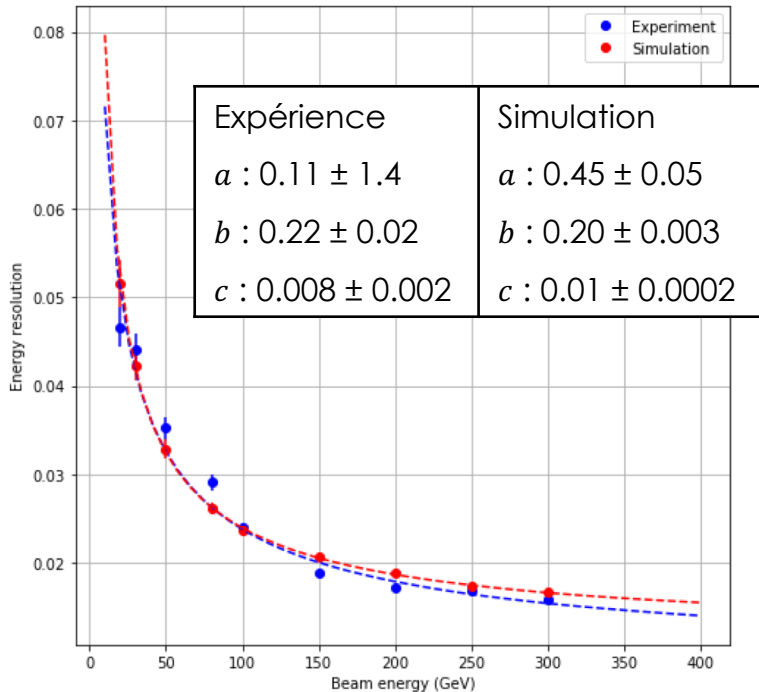
- Simulation : Distributions gaussiennes
- Gaussienne : $y = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$



Linéarité et résolution en énergie

Distribution de l'énergie détectée :

- Gaussienne : $y = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\cdot\sigma^2}\right)$
- $\mu \rightarrow$ Valeur des points
- $\sigma \rightarrow$ Incertitude



Résolution en énergie : $\frac{\sigma_E}{\langle E \rangle} = a \frac{1}{E} \oplus b \frac{1}{\sqrt{E}} \oplus c$

- a : terme de bruit
- b : terme stochastique
- c : terme constant

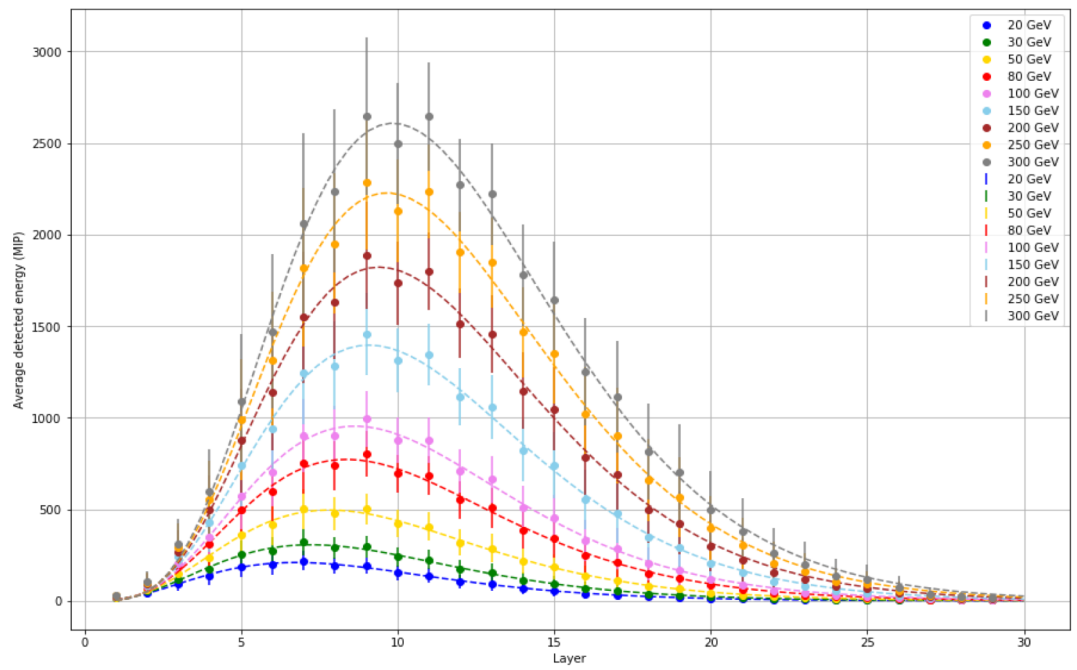
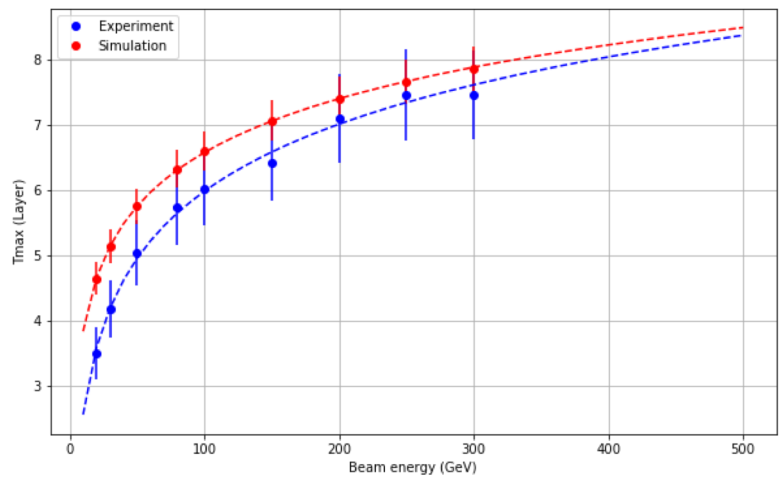
TDR [1] : b entre 20 et 25% et c en dessous de 1%

→ Résultats en accord avec le TDR

Profil longitudinal des gerbes

Le profil longitudinal :

- Distribution de l'énergie couche par couche → Gaussienne
- Valeur moyenne de la gaussienne en fonction de la couche
- Fonction d'ajustement : $y = A \cdot x^\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot x)$



Le maximum de la gerbe :

- Définit par : $T_{Max} = \frac{\alpha-1}{\beta}$
- Incertitude : $\sigma = \frac{1}{\beta^2} \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \frac{1-\alpha}{\beta} \sigma_\beta^2}$
- Fonction d'ajustement : $y = A \cdot \log\left(\alpha \frac{\alpha-1}{\beta}\right)$

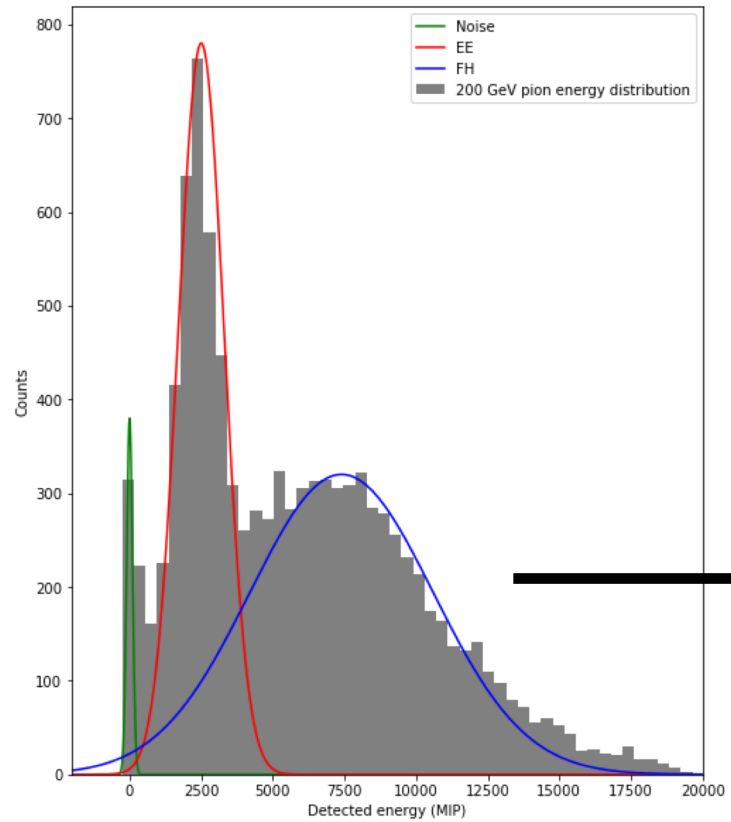
→ On retrouve bien les profils théoriques

Etude des performances du calorimètre - Les pions

Distribution en énergie

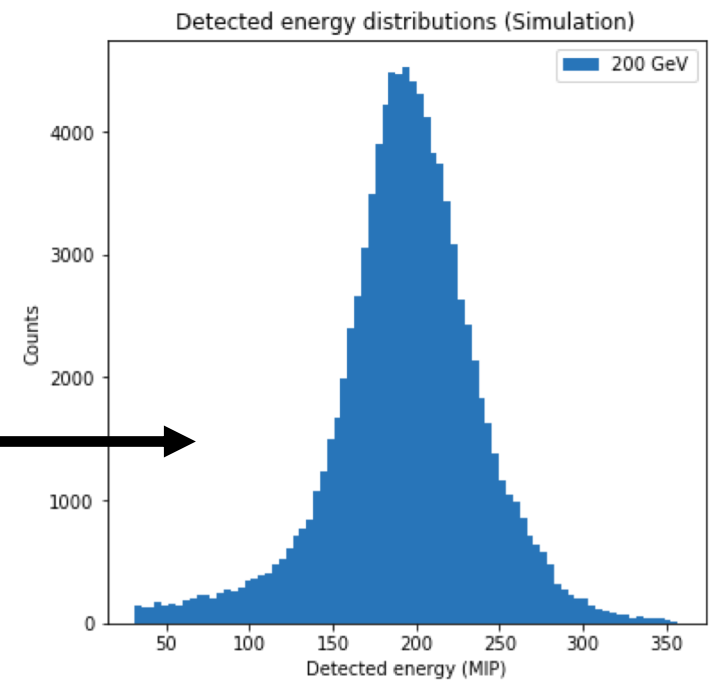
Distribution en énergie non gaussienne :

- Pic de 1 MIP (bruit)
- Gaussienne « électromagnétique » E_{EE}
- Gaussienne « hadronique » E_{FH}



Obtenir une distribution gaussienne :

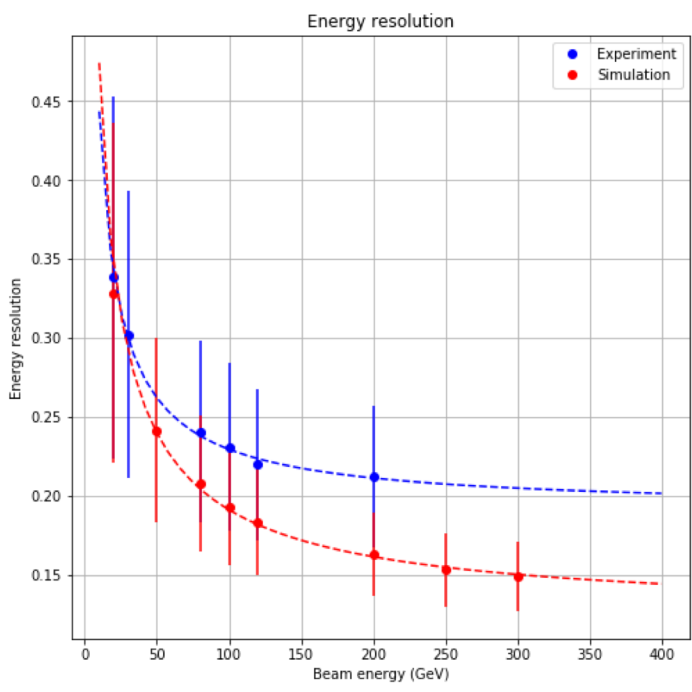
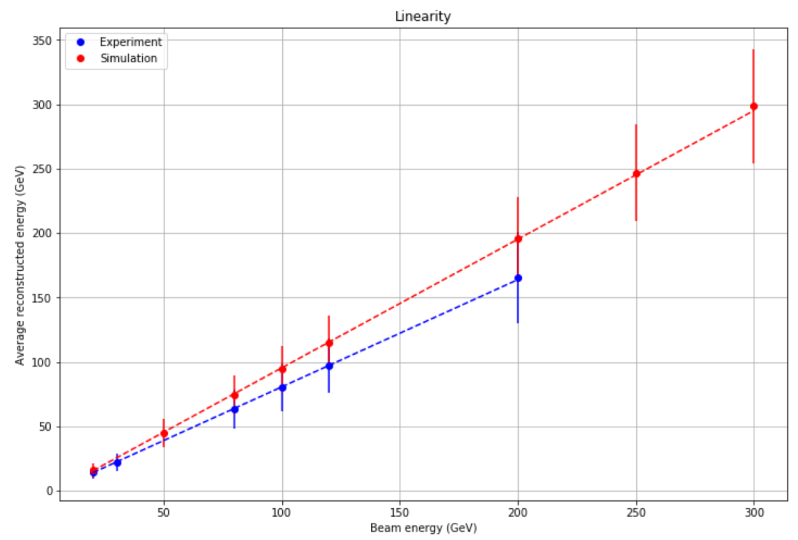
- Minimiser la fonction $\frac{(\alpha_{EE}E_{EE} + \alpha_{FH}E_{FH} - E_{Beam})^2}{E_{Beam}}$ en faisant varier α_{EE} et α_{FH}
- Energie gaussienne : $E_{Rec} = \alpha_{EE}E_{EE} + \alpha_{FH}E_{FH}$



Linéarité et résolution en énergie

Distribution de l'énergie détectée :

- Gaussienne : $y = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$
- $\mu \rightarrow$ Valeur des points
- $\sigma \rightarrow$ Incertitude



Résolution en énergie : $\frac{\sigma E}{\langle E \rangle} = a \frac{1}{E} \oplus b \frac{1}{\sqrt{E}} \oplus c$

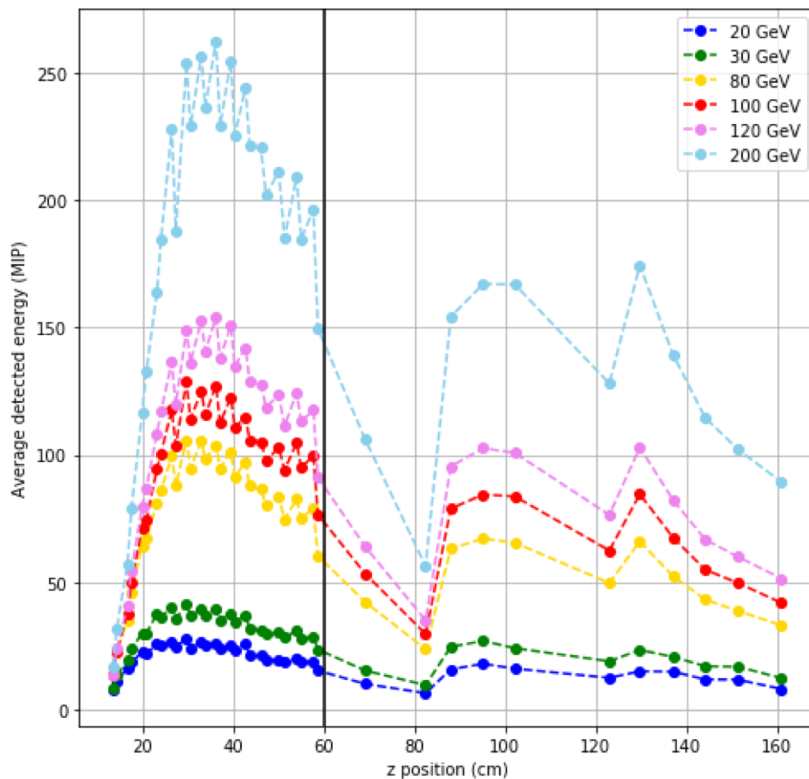
- a : terme de bruit
- b : terme stochastique
- c : terme constant

Expérience : $c = 0.19 \pm 0.002$ et $b = 1.26 \pm 0.03$
 Simulation : $c = 0.12 \pm 0.002$ et $b = 1.44 \pm 0.03$

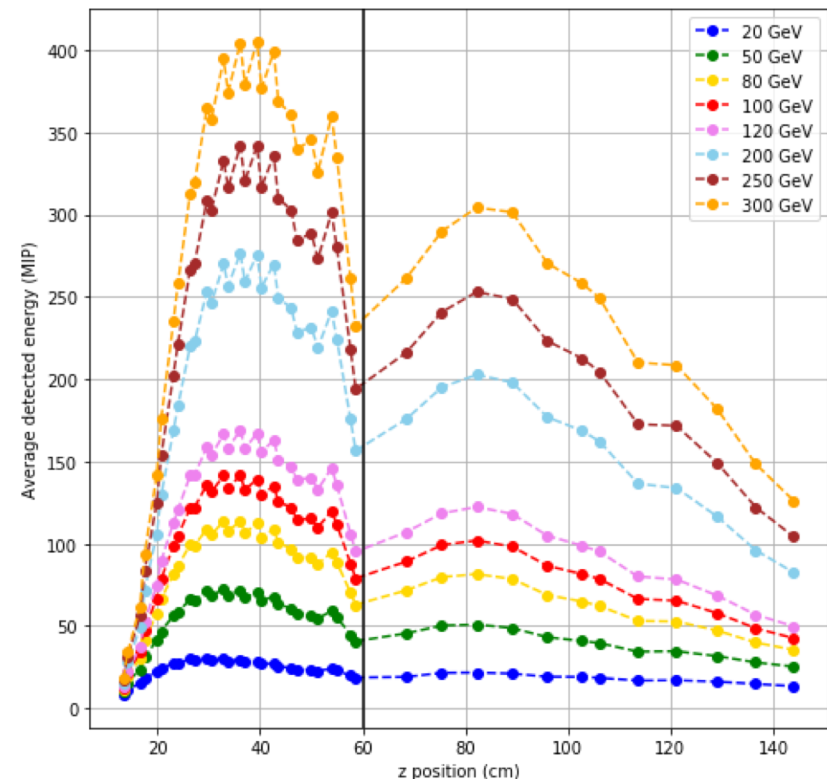
Profil longitudinal des gerbes

- AHCAL CALICE pas pris en compte → Pas toute la gerbe
- Interagissent plus loin que les électrons

Expérience



Simulation



Etude des performances de mesures temporelles

Présentation des mesures temporelles

- **Pourquoi le fast timing ?**

- Mieux détecter les particules neutres (neutrons, photons...)
- Savoir si les particules proviennent du vertex primaire

- **Données utilisées**

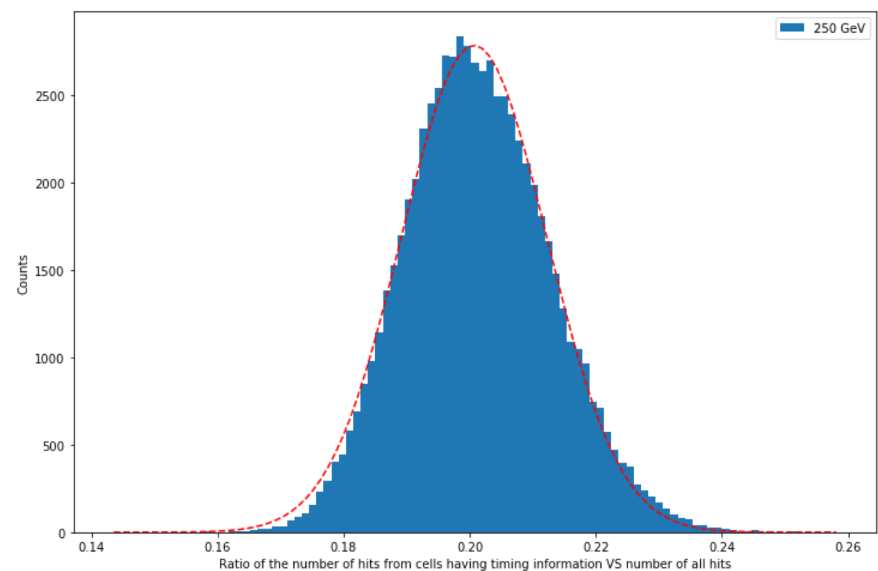
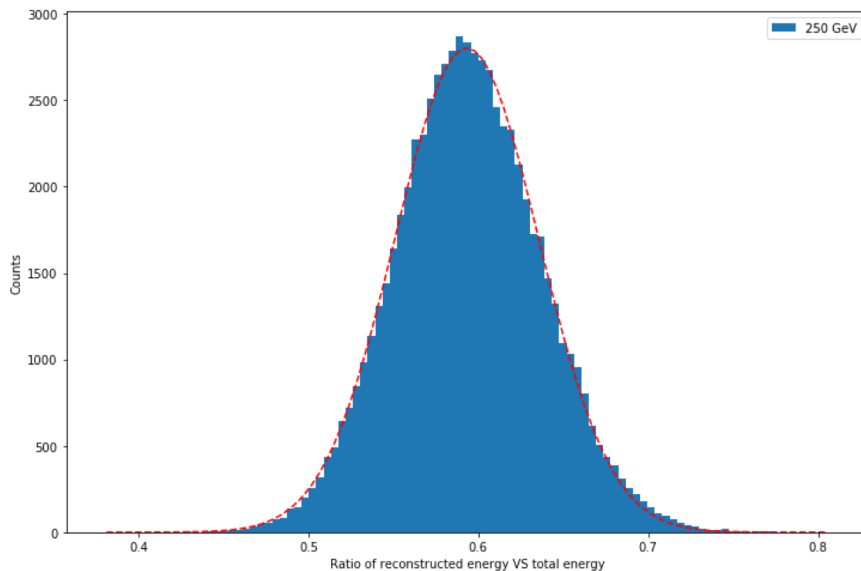
- Simulation Geant4
- Pas de simulation de l'électronique de lecture
- Seulement pour les électrons

- **Informations temporelles par cellule**

- Temps lorsque l'énergie cumulée atteint 15 MIP
- Temps du premier hit
- Temps du dernier hit

Comparaison des données

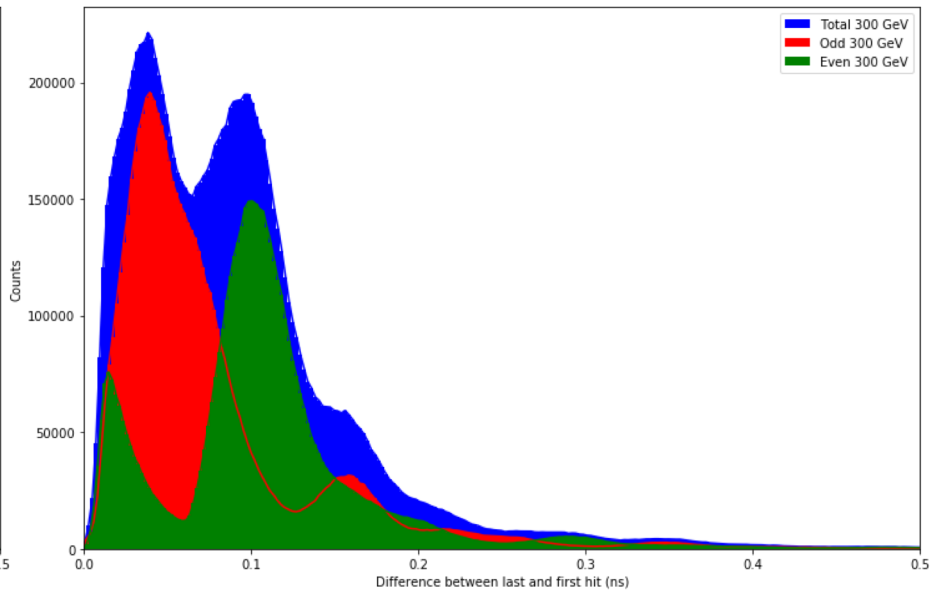
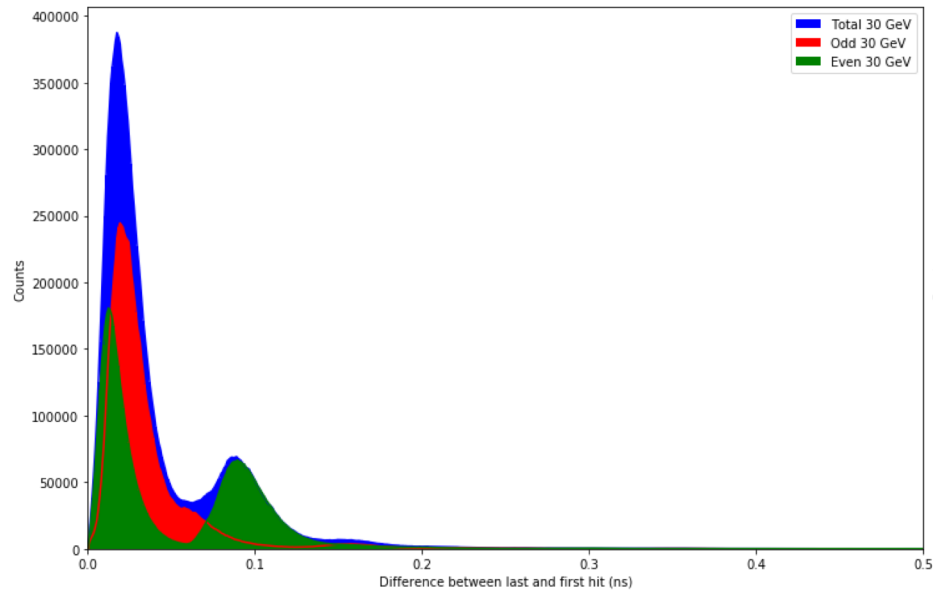
- Toutes les distributions sont gaussiennes
- $\approx 60\%$ de l'énergie pris en compte
- De 13 à 20% de hits pris en compte



Différence de temps dans une cellule

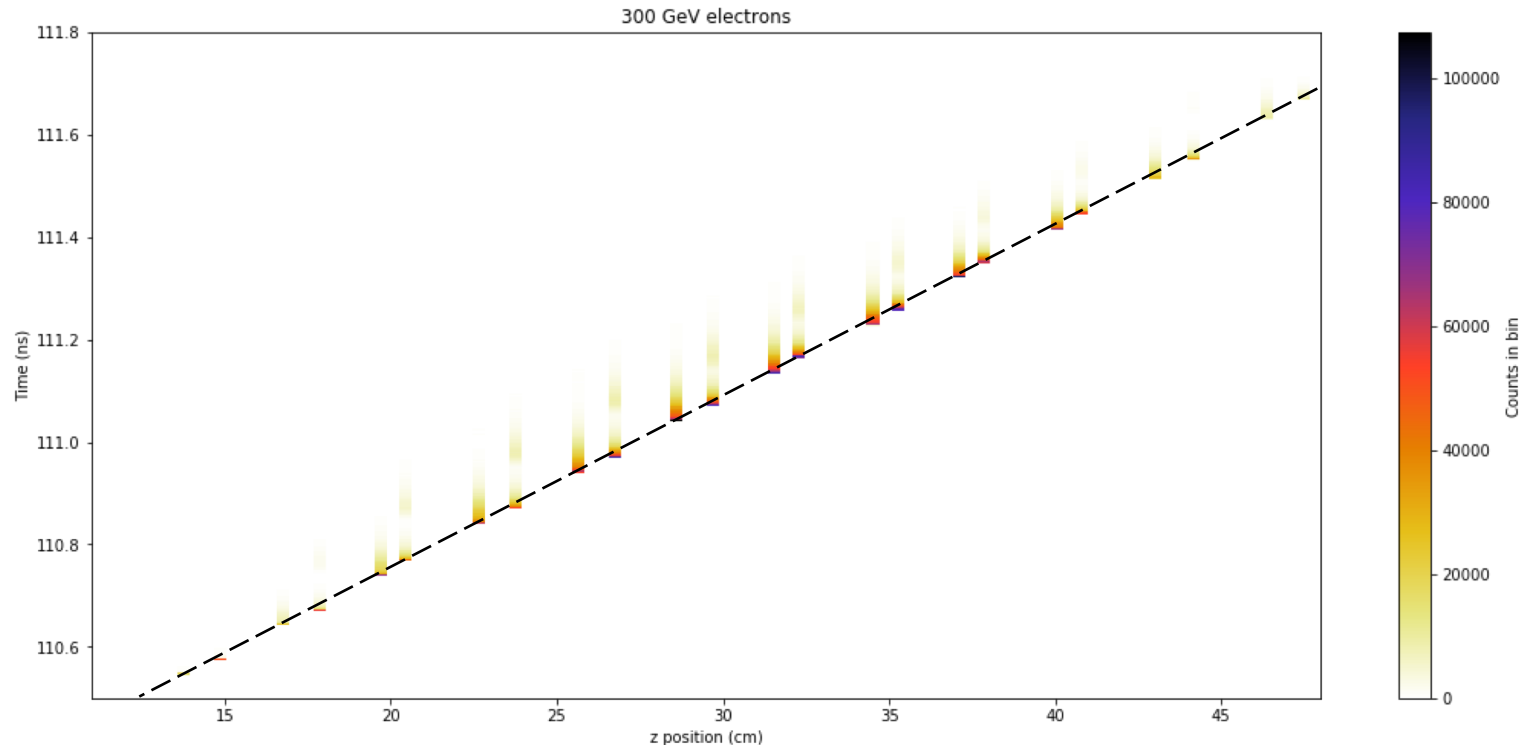
Variable d'intérêt : $dt = \text{Temps du dernier hit} - \text{Temps du premier hit}$

- Rouge = couches impaires
- Vert = couches paires
- Bleu = Rouge + Vert = toutes les couches
- Premier pic à 0,05 ns → Une seule particule interagissant plusieurs fois dans une cellule
- Pics secondaires → venant peut être de back scattering dans les couches d'absorbeur



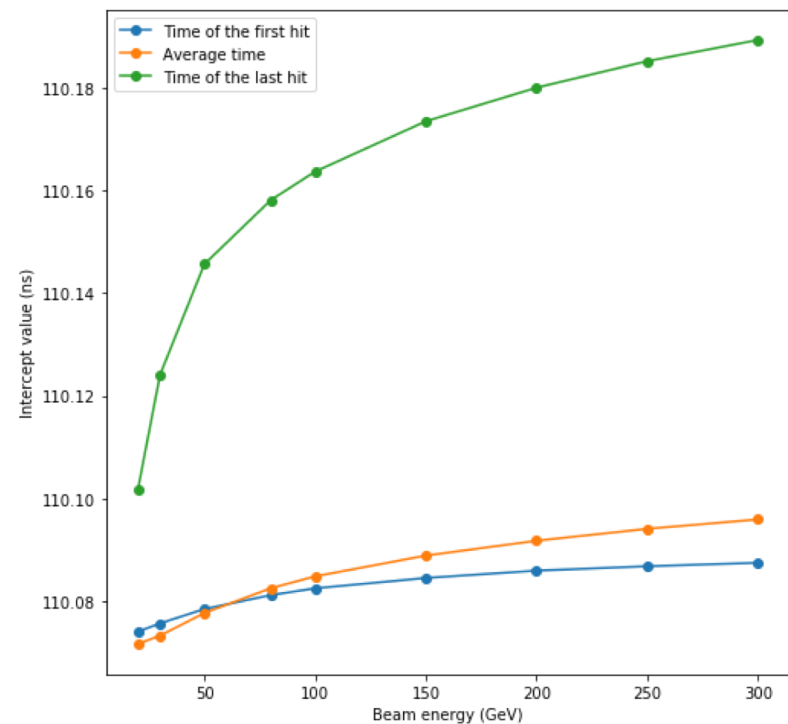
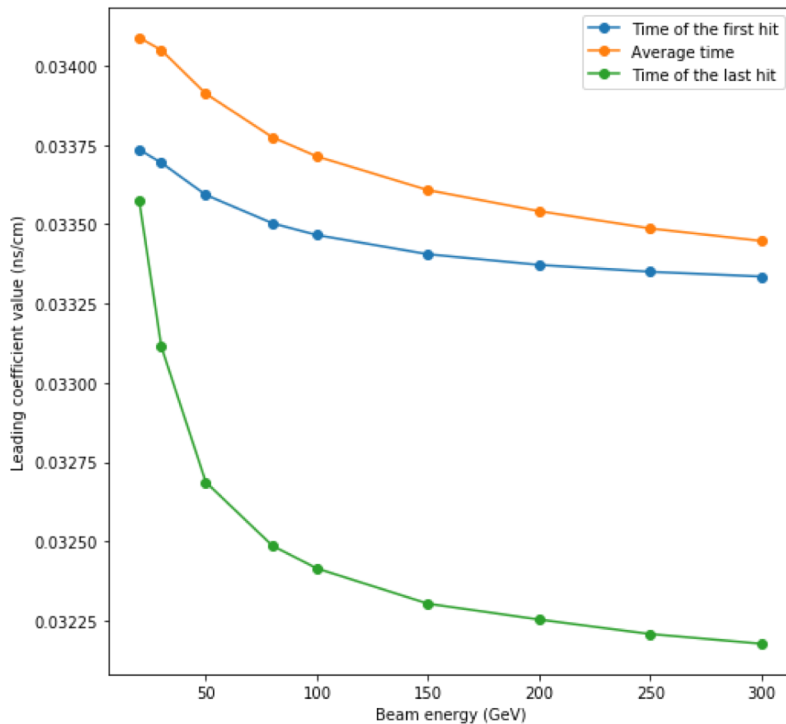
Calcul du temps de vol

- Distribution du temps au dessus du seuil de 15 MIP
- Calcul de la valeur médiane
- Ajustement des valeurs médianes en fonction de la profondeur : $T = \frac{1}{c}z + t$



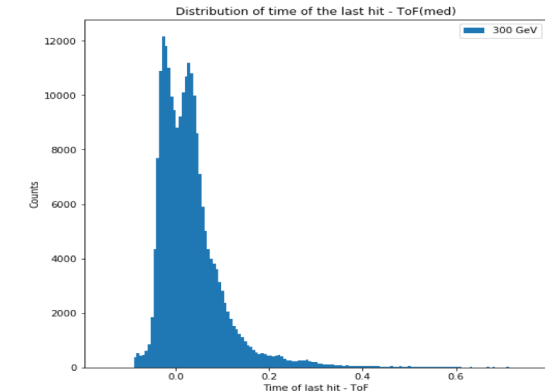
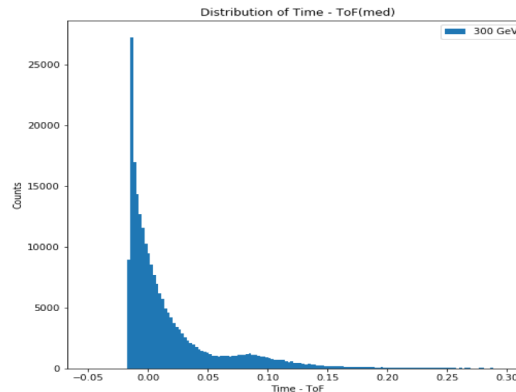
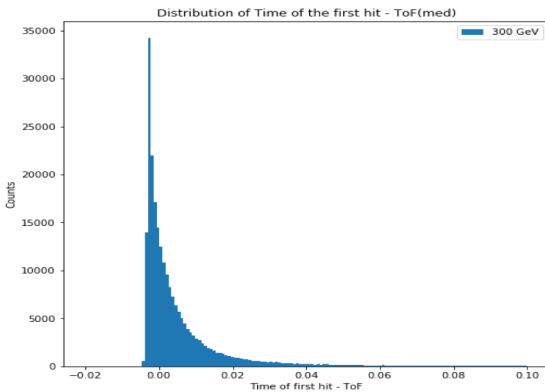
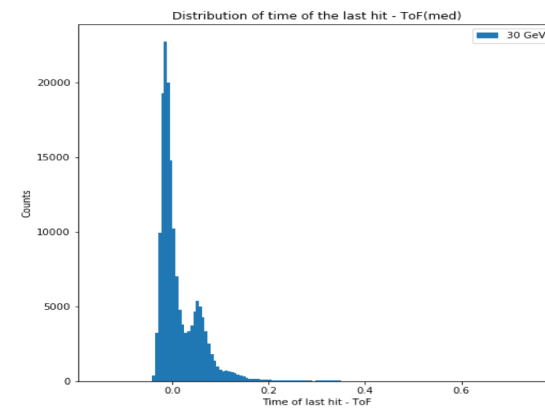
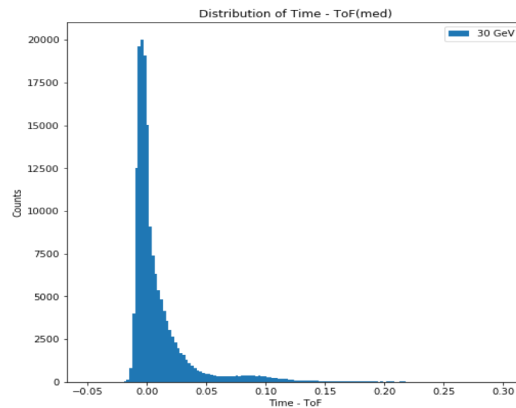
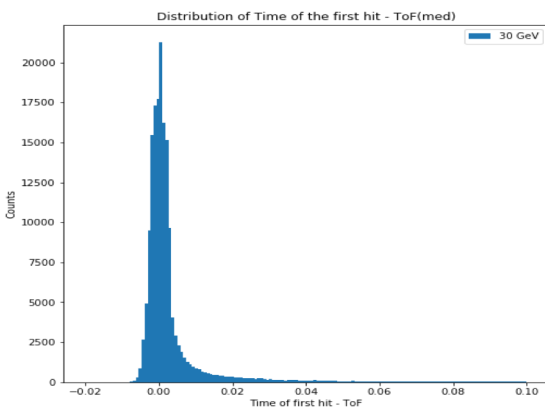
Calcul du temps de vol

- Calcul des coefficients $\frac{1}{c}$ et t pour chaque énergie
- t = temps initial
- $\frac{1}{c}$ = inverse de la vitesse des particules



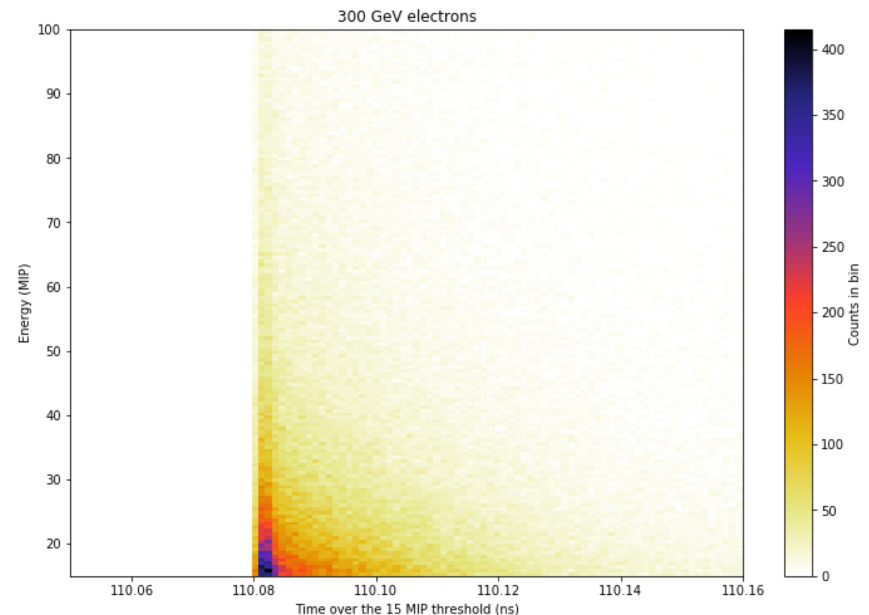
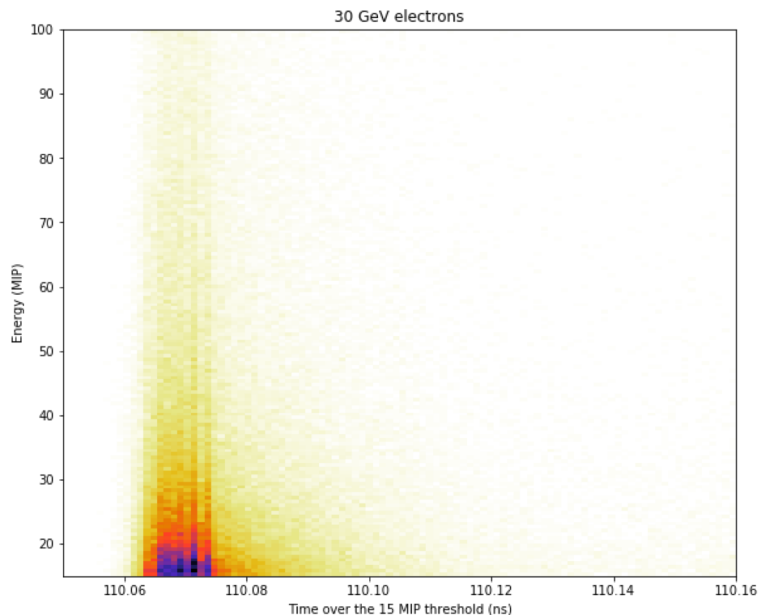
Correction du temps de vol

- **Méthode** : Soustraire $\frac{1}{c} z$ aux différentes informations temporelles
(z est la profondeur de la cellule où est issu le temps)
- Premier pic en accord avec le passage d'une seule particule
- Pics secondaires provenant peut être de back scattering



Dépendance en énergie

- Temps au dessus du seuil de 15 MIP avec une correction du temps de vol en fonction de l'énergie détectée
- Majeure partie de l'énergie détectée en 20 ps
→ 20 ps d'après le TDR



Conclusion

Electrons

- Résolution en énergie pour l'expérience très proche de celle de la simulation : $c = 0.8\%$ & 1% et $b = 22\%$ & 20% .
- Profils longitudinaux pour les gerbes → simulation très proche de la réalité.

Pions

- Ecart plus important → toujours plus difficiles à modéliser et à calibrer
→ perte d'information (AHCAL CALICE)
- Résultats encourageant

Timing

- Calcul du temps de vol
- Quantification de la perte d'informations
- Continuité du stage → Etudier les informations temporelles pour les pions
→ Etudier les données de l'expérience et comparer les résultats
→ Améliorer le calcul du temps de vol

Références

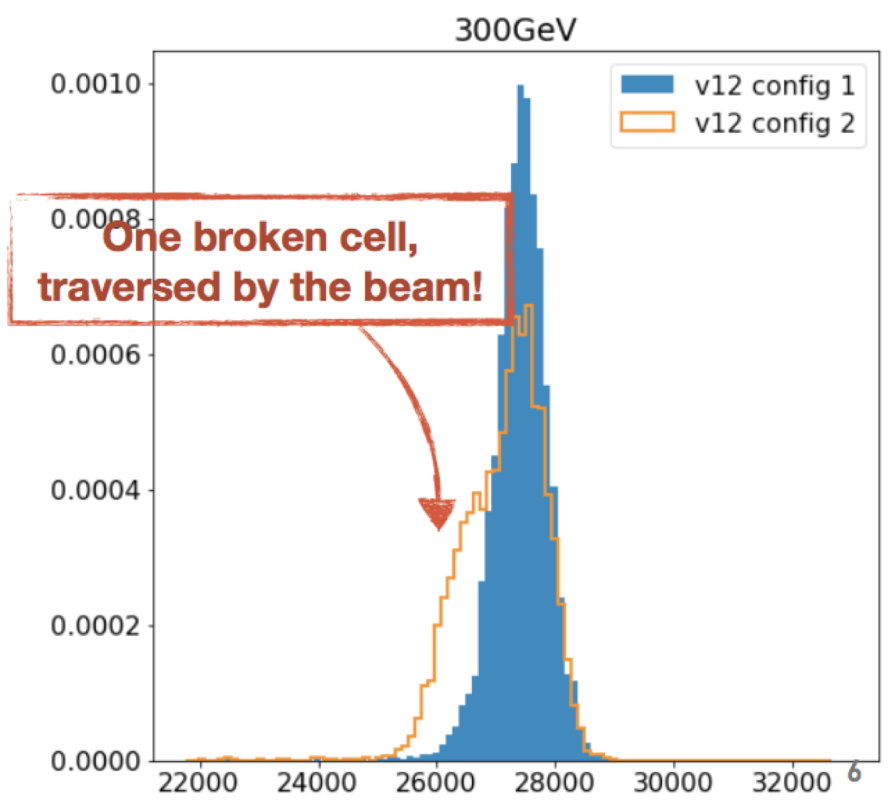
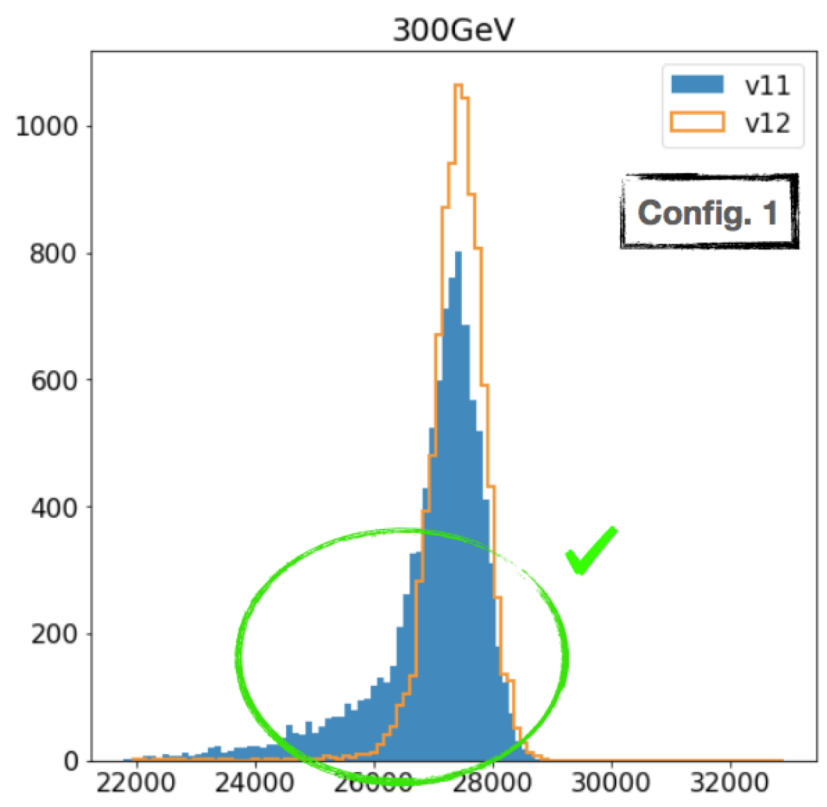
1. CMS Collaboration, *The Phase-2 Upgrade of the CMS endcap calorimeter, Technical Design Report*, 9 avril 2018
2. OCHANDO Christophe, *Upgrades Phase II de CMS : Introduction calorimétrie HGAL*, CS IN2P3, 22 juin 2017
3. SEFKOW Felix, *The new scintillator-SiPM-based analogue HCAL prototype*, CHEF2017, Lyon, 2 octobre 2017
4. LOBANOV Artur, *The CMS High Granularity Calorimeter for HL-LHC*, LLR CDD seminar, 27 février 2019
5. LOBANOV Artur, *October Test Beam : Summary*, HGAL System Tests Meeting, 24 octobre 2018
6. LANGE Clemens, *Pion analysis, HGCal 2018 beam tests*, HGAL Beam Test Meeting, 22 janvier 2019
7. PANDEY Shubham & SHARMA Seema, *Pion Data study for CERN TB October 2018*, HGAL Beam Test Meeting, 22 janvier 2019
8. BENDAVID Josh, *Precision Timing in CMS*, HGAL Beam Test Meeting, 22 janvier 2019
9. MARTELLI Arabella, *Precision timing in HGAL with material from HGAL TDR and test beam working group*, HGAL Workshop March 2019, 11 mars 2019
10. MARTELLI Arabella, *The CMS HGAL detector for HL-LHC upgrade*, PRISMA Colloquium and Seminar of the Graduate School, Johannes Gutenberg University Mainz, 31 mai 2017
11. MARTELLI Arabella, *The CMS HGAL detector for HL-LHC upgrade*, Proceedings of the Fifth Annual LHCP, 18 février 2018

Merci de votre attention !

Annexes

Annexe 1

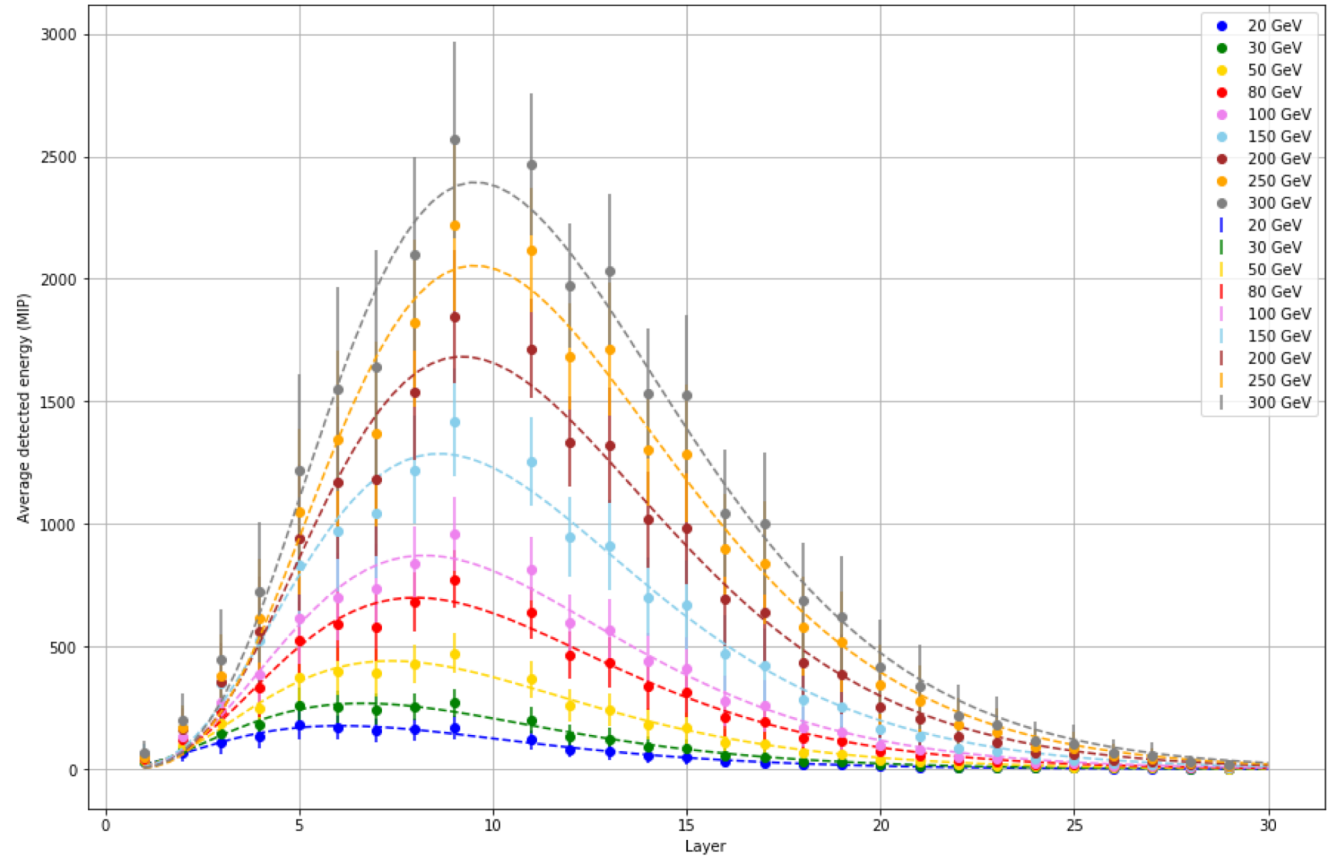
Distributions en énergie : Electrons



Annexe 2

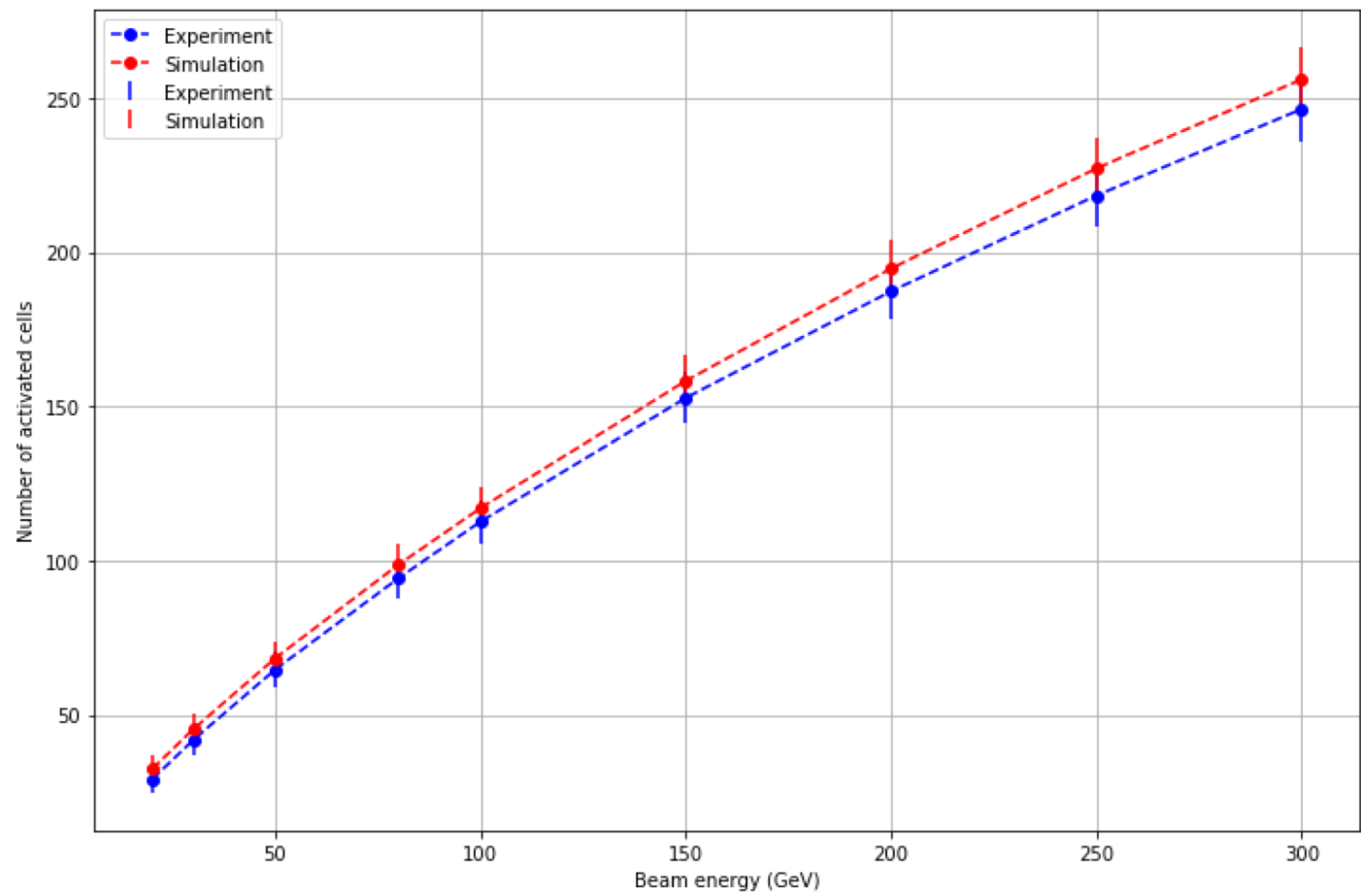
Profil longitudinal : Expérience

- Couche 10 pas prise en compte



Annexe 3

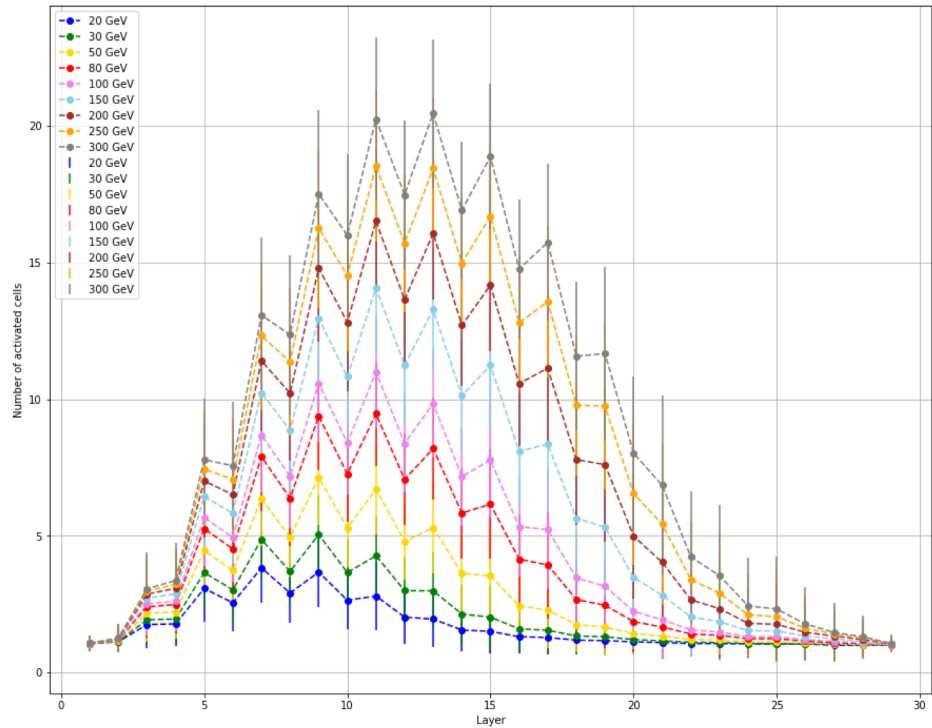
Nombre de cellules activées - Electrons



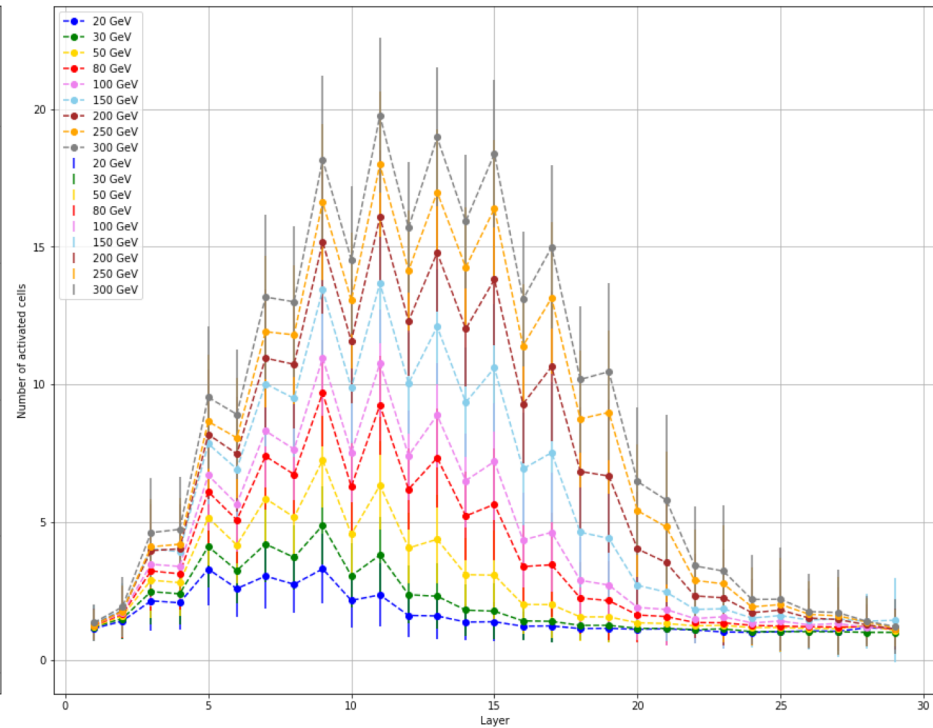
Annexe 4

Profil longitudinal du nombre de cellules activées - Electrons

Expérience



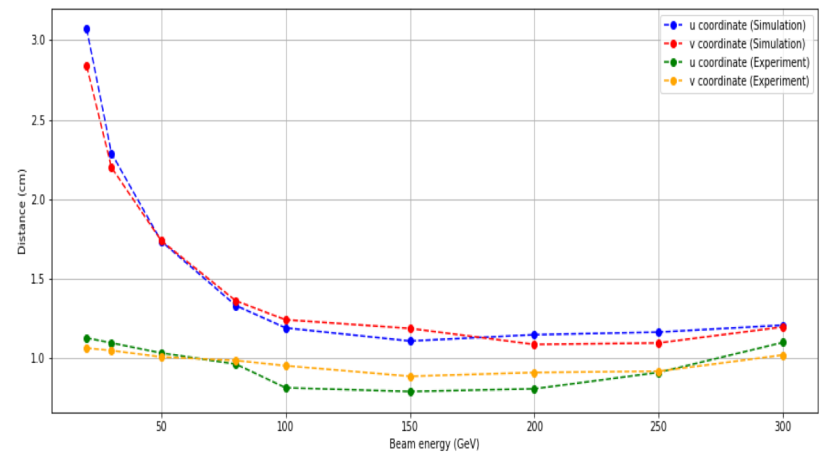
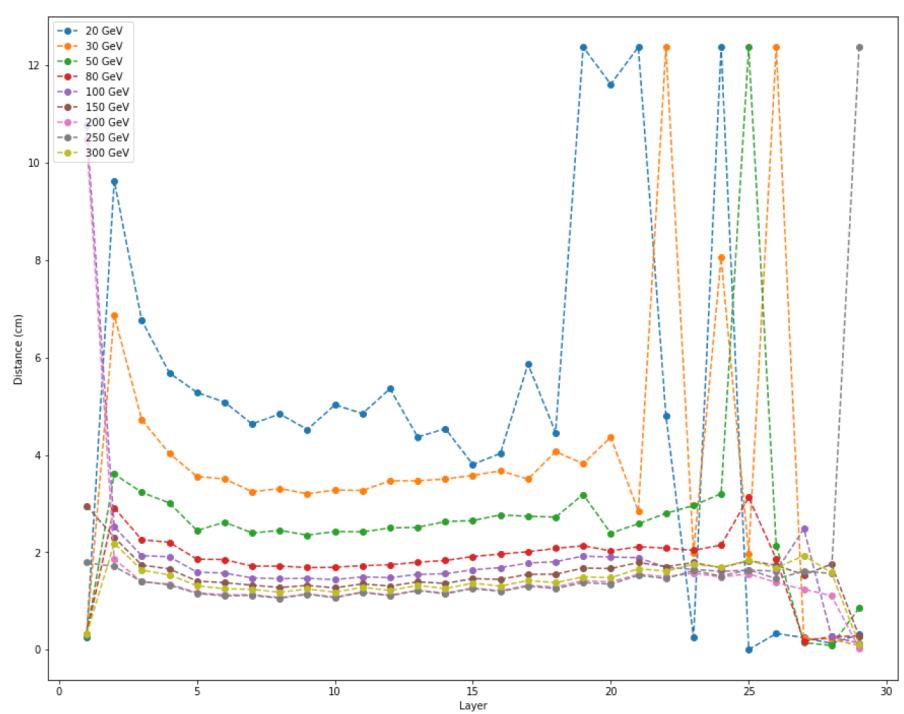
Simulation



Annexe 5

Distribution en énergie en fonction des axes u et v → Gaussienne

Permet d'obtenir le rayon du cercle contenant 90% de l'énergie détectée



Le profil longitudinal du rayon du cercle contenant 90% de l'énergie détectée :

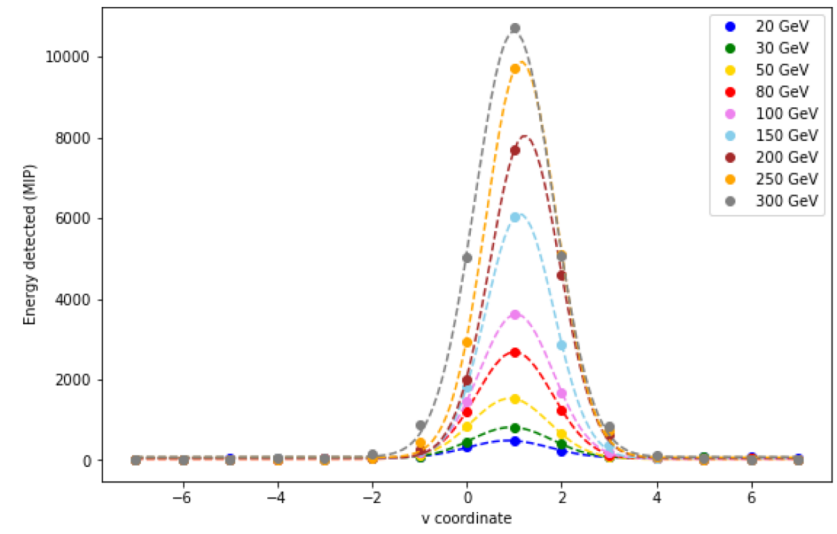
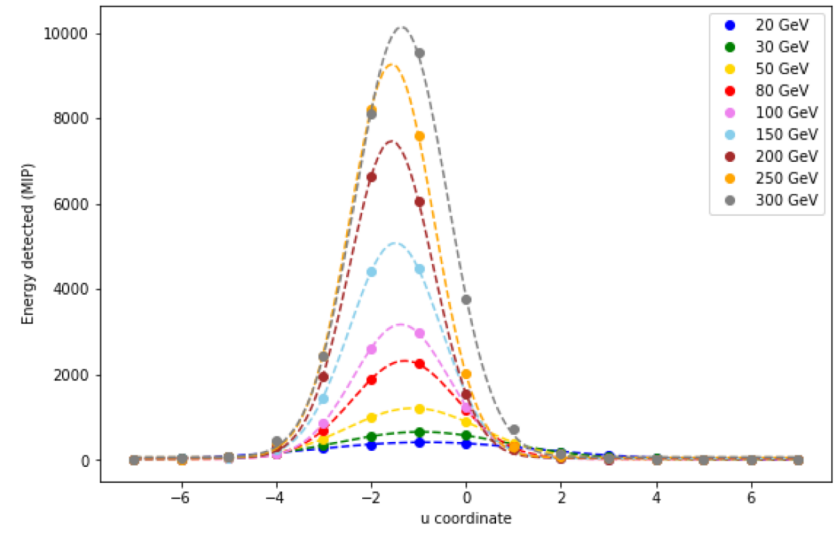
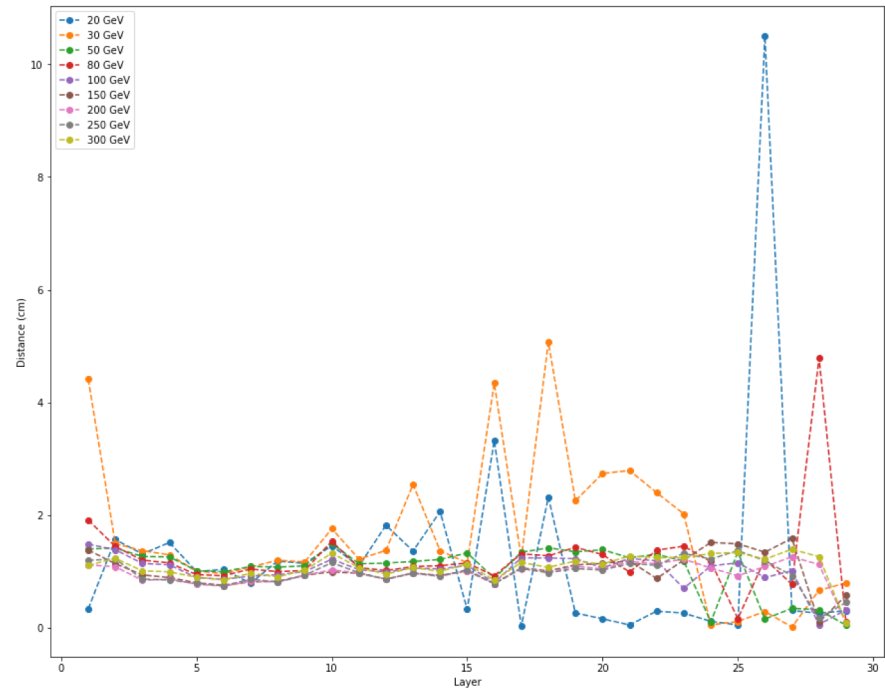
- Même rayon pour toutes les couches
- Rayon plus petit, plus l'énergie est élevée
- Plus de fluctuations pour les basses énergies

Annexe 6

Profil transverse – Electrons

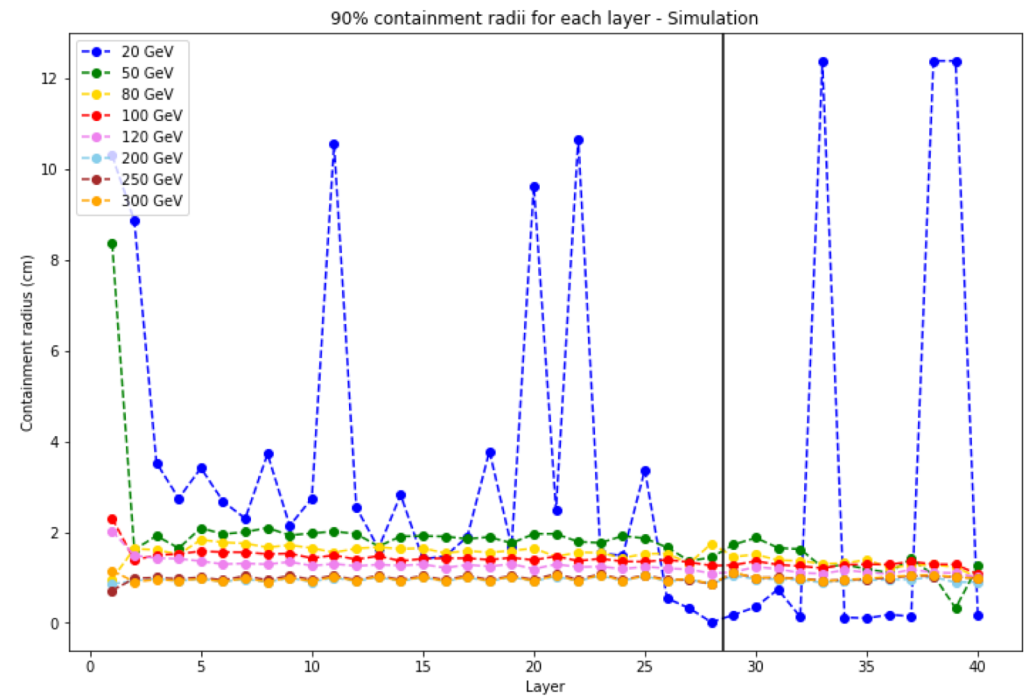
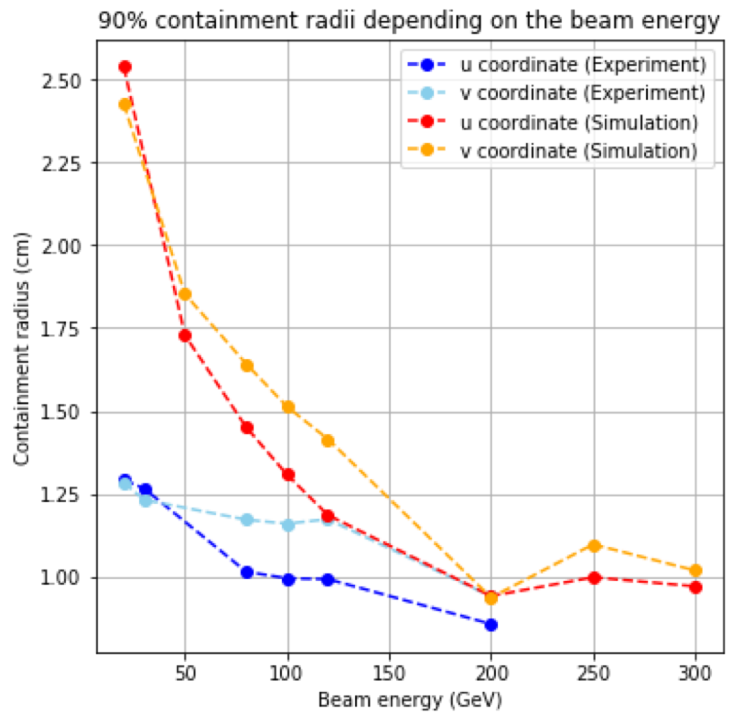
- Distributions gaussiennes

Expérience



Annexe 7

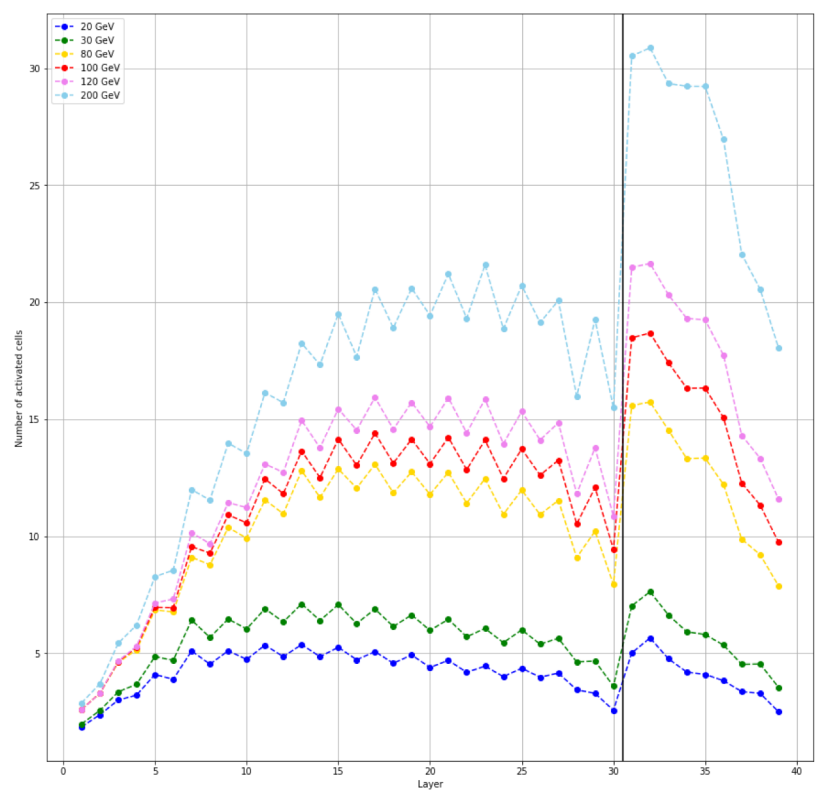
- Comportement similaire à celui des électrons
- Le rayon reste le même quelque soit la profondeur
- Le rayon est proche de 0 pour les faibles énergies dans la partie CE-H



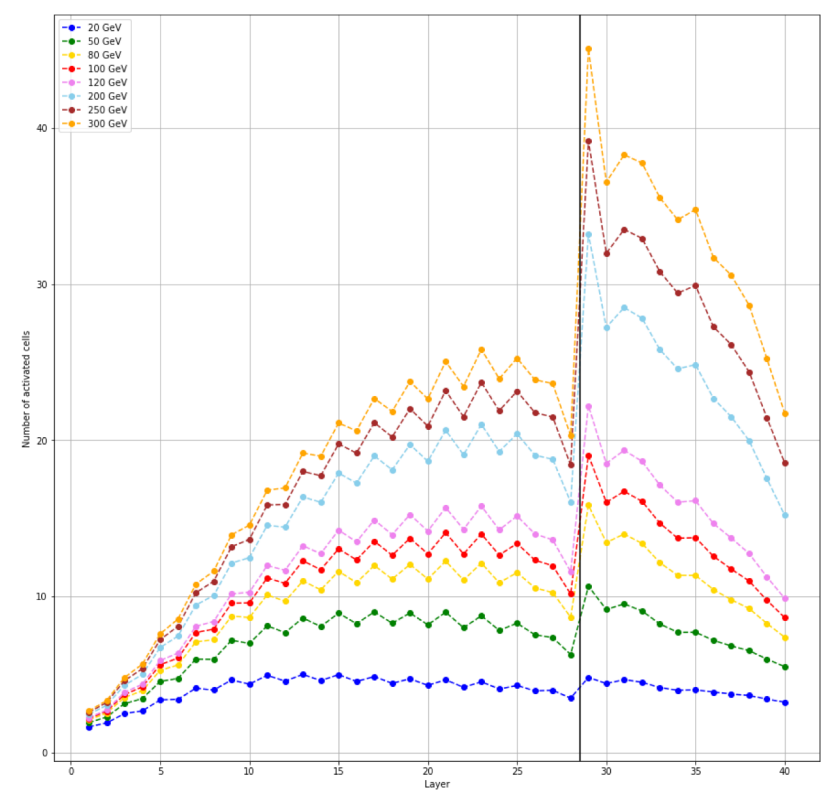
Annexe 8

Profils longitudinaux du nombre de cellules activées - Pions

Expérience

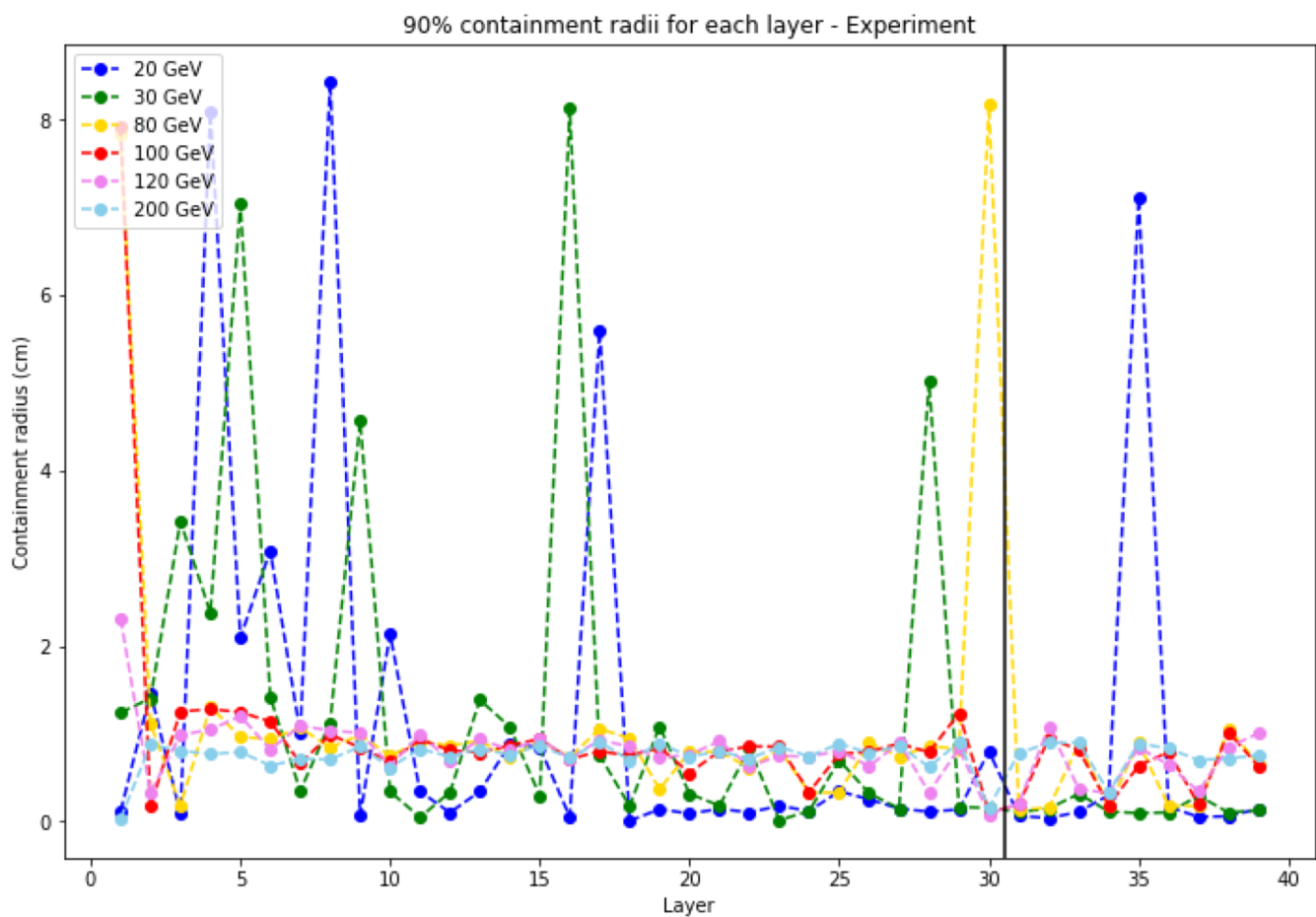


Simulation



Annexe 9

Profil transverse – Pions



Annexe 10

Vue 3D d'une gerbe dans le détecteur

300 GeV pion starting showering in CE-E

